

**Kanton St.Gallen**

# Beurteilung und Nachbildung von Teilverklausungen

## Technischer Bericht

**Genehmigt:**

**St.Gallen, den 14.09.2017**

**Ausfertigung für:**

Kanton St.Gallen  
Baudepartement  
Amt für Wasser und Energie  
Abteilung Naturgefahren

Projektverfasser:

**Ingenieure Bart AG**  
Waisenhausstrasse 15  
9000 St.Gallen  
Tel. 071 228 01 70

Ingenieure  
GA Bart Bart AG

Datum:	Autoren:	Kontrolliert:	Eingesehen:	Projektnummer:
15.08.2017	cv	rb, ms	<>	25386



# Beurteilung und Nachbildung von Teilverkläusungen

## Inhalt

<b>I</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
1.1	Anlass.....	2
1.2	Zielsetzungen.....	2
1.3	Ausblick.....	3
<b>2</b>	<b>Beurteilungskriterien Teilverkläusung</b>	<b>3</b>
2.1	Definition Lichtraumprofil .....	3
2.2	Tal- und Seitengewässer .....	3
2.3	Gerinnebreite .....	3
2.4	Froude-Zahl .....	4
2.5	Zusammenfassung Beurteilung .....	5
<b>3</b>	<b>Festlegung der Auswirkungen der Teilverkläusung</b>	<b>6</b>
3.1	Einleitung.....	6
3.2	Aufstauhöhe durch Teilverkläusung.....	6
3.3	Umsetzung Aufstauhöhe in der Modellierung .....	6
3.3.1	Zielsetzung und Vorgehen.....	6
3.3.2	Modellaufbau.....	6
3.3.3	Ergebnisse Modellierungen.....	7
3.3.4	Festlegung Vorgehen Modellierung .....	8
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Anwendungsfälle</b>	<b>9</b>
4.1	Kriterien und Auswirkungen Teilverkläusung.....	9
4.2	Anwendungsfälle .....	9
<b>5</b>	<b>Literatur und Grundlagen</b>	<b>11</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Verkläusungsgrade für die Abbildung der Teilverkläusung im numerischen Modell	7
-----------	---	---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Sohlenbreite als Kriterium der Teilverkläusung	3
Abbildung 2	Beurteilungsschema für Voll- oder Teilverkläusung	5
Abbildung 3	Verschiedene Konfigurationen für die Abbildung der Teilverkläusung	7
Abbildung 4	Modellierter Aufstau aufgrund Teilverkläusung	8
Abbildung 5	Reduktion des Lichtraumprofils durch Sohlenerhebung des Gerinnes	8



# I Aufgabenstellung

## I.1 Anlass

Die Einschätzung der Verklausungswahrscheinlichkeit von Brücken und Durchlässen ist ein wichtiger Aspekt bei der Gefahrenbeurteilung. Unter Verklausung wird hierbei eine Blockierung des Abflussquerschnitts mit Schwemmholz, Wurzelstöcken oder anderen Schwemmstoffen verstanden. Der Kanton St. Gallen besitzt ein Regelwerk zur Einordnung und Quantifizierung der Verklausungswahrscheinlichkeit, das sich in der Praxis bewährt [1].

In einigen Situationen führt jedoch die bisherige Annahme einer vollständigen Verklausung des Bauwerks zu einer übermässig konservativen Betrachtung, die zu unrealistisch grossen Ausuferungen und Gefahrenereinschätzungen führt. In folgenden Fällen ist stattdessen die Annahme einer Teilverklausung sinnvoll:

- Brücken über breite Gerinne. Es ist selbst bei grösseren Schwemmholzmengen unwahrscheinlich, dass das aufgehaltene Schwemmholz den gesamten Fliessquerschnitt abriegelt. Einzelne Hölzer, die unter das Bauwerk gezogen werden, können das Bauwerk aufgrund seiner grossen Breite passieren, ohne an Gerinne oder Bauwerk anzuhängen.
- Langsam fliessende Gewässer können eine hohe Verklausungswahrscheinlichkeit haben. Aufgrund der geringen Strömungskräfte ist der entstehende Verklausungskörper jedoch wenig kompakt und es entstehen nur lockere, ein- oder mehrlagige Verklausungskörper bzw. Schwemmholzteppiche, welche den Querschnitt nicht komplett abriegeln.
- Bei tiefen Gewässern reicht der von der Brücke ausgehende Schwemmholzkörper nicht bis zur Sohle hinab und es ist keine vollständige Blockierung der Strömung anzunehmen.
- Das Vorhandensein von nur kurzen Hölzern und das Fehlen von besonders problematischen Wurzelstöcken verringert ebenfalls die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein kompakter Verklausungskörper bildet, der den Fliessquerschnitt komplett blockiert. Dieser Fall ist jedoch bestenfalls realistisch als Folge eines vorgeschalteten Rückhaltebauwerks mit grossem Rückhalteraum, der grosse Schwemmholzanteile vollständig zurückhält.

## I.2 Zielsetzungen

Dieser Bericht nennt Kriterien für eine plausible Beurteilung, ob von einer teilweisen oder einer vollständigen Verklausung eines Bauwerks auszugehen ist.

Weiter wird die Frage nach den hydraulischen Auswirkungen einer Teilverklausung einer Brücke oder eines Durchlasses untersucht. Es soll eine Hilfe für die Grobabschätzung dieser hydraulischen Auswirkungen und deren Abbildung in der numerischen Modellierung gegeben werden. Diese hydraulischen Auswirkungen ergeben sich als Folge der Ausmasse und der Form des Verklausungskörpers, der sich am Bauwerk ausbildet. Dieser besteht aus ineinander verhakten und blockierten Hölzern, die mit zusätzlichem Feinholz und Zivilisationsmüll abgedichtet sein können und den verfügbaren Querschnitt reduzieren.

Die Frage nach der Verklausungswahrscheinlichkeit wird dagegen in diesem Bericht ausdrücklich nicht behandelt. Dafür wird auf das bestehende Regelwerk [1] des Kantons St. Gallen verwiesen. Manche Massnahmen, wie z. B. ein Gerinneausbau, können dabei unterschiedliche Effekte haben. Sie können sowohl die Verklausungswahrscheinlichkeit verringern als auch im Falle einer Verklausung zur Beurteilung einer teilweisen Verklausung mit geringeren Aufstauhöhen und Ausuferungen führen.

### 1.3 Ausblick

Aktuell wird im Bereich der Schwemmholzproblematik und Brückenverklauung viel geforscht. Zu Brückenverklauungen laufen z. B. an der ETH Zürich und der TU Innsbruck aktuelle Arbeiten. Die vorliegenden Empfehlungen sollten zu gegebener Zeit mit weiteren Forschungsergebnissen oder Erhebungen des Gefahrenkatasters überprüft und ggf. verbessert werden. Der vermutete Schwankungsbereich des Aufstaus liegt jedoch in einem Rahmen, der mit den nötigen Sicherheitszuschlägen (Freiborden) in den meisten Fällen gute Lösungen erlaubt. Die Verklauungsbeurteilung wird immer eine praxisnahe Pragmatik erfordern, die in der Grössenordnung zu richtigen Beurteilungen führt.

## 2 Beurteilungskriterien Teilverklauung

### 2.1 Definition Lichtraumprofil

Die Fläche des Lichtraumprofils des zu beurteilenden Bauwerks wird im Folgenden als «Lichtraumprofil» bezeichnet. Diese Fläche ist ein geometrischer Wert, der durch das Bauwerk und das Gerinne festgelegt ist. Bei einer Brücke handelt es sich um die Fläche des lichten Profils unterhalb der Brückenplatte und beim Durchlass um dessen Querschnittsfläche.

### 2.2 Tal- und Seitengewässer

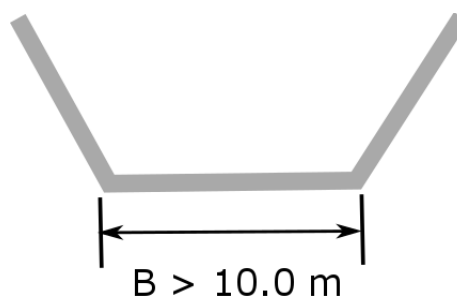
Bei Seitengewässern wird weiterhin von einer kompletten Verklauung ausgegangen. Typische Verhältnisse sind hierbei steilere Gerinne mit kleineren Fliessquerschnitten, die in Hinblick auf die Ausmasse des Verklauungskörpers grundsätzlich ungünstig sind.

Die Beurteilung als Teilverklauung ist nur möglich, wenn es sich um ein **Talgewässer** handelt. Die Einteilung in Seiten- bzw. Talgewässer erfolgt gemäss den Kriterien in [1].

### 2.3 Gerinnebreite

Anstelle einer Vollverklauung kann in einem Talgewässer eine Teilverklauung angenommen werden, falls die **Sohlenbreite B grösser 10 m ist**. Diese Breite liegt tendenziell über der Länge der massgebenden Schwemmholzelemente [6]. Bei diesen breiten Gerinnen ist davon auszugehen, dass ein etwaiger Schwemmholzkörper sich nicht über die gesamte Breite und Tiefe des Gerinnes erstreckt. Selbst bei grösseren Schwemmholzmengen verbleiben freie Anteile des Fliessquerschnitts, die sich durch die lokale Abflussbeschleunigung im verbleibenden Fliessquerschnitt auch teilweise selbst freihalten.

**Abbildung 1** Sohlenbreite als Kriterium der Teilverklauung



Als Mass der Gerinnebreite wird die Sohlenbreite empfohlen, weil diese für die Anfälligkeit einer Verklauung die massgebende Grösse ist und ein eindeutiges Kriterium darstellt

Im Fall von sehr ungünstigen Verhältnissen, wie bei Brücken in stark gekrümmten Kurven, hohem Geschiebetransport und besonders grossen Schwemmholz mengen, insbesondere mit Wurzelstöcken, ist es u.U. sinnvoll, eine grössere Mindestbreite anzusetzen. Allerdings können die aufgeführten Punkte bereits durch die Definition des Talgewässers teilweise ausgeschlossen werden und werden daher hier nicht weiter berücksichtigt.

## 2.4 Froude-Zahl

Die Froude-Zahl ein massgebender Parameter für die Kompaktheit und Form des Verklauungskörpers ist [2]. Die Froude-Zahl ( $Fr$ ) der ungehinderten Anströmung (ohne Verklauung) berechnet sich aus der Geschwindigkeit  $v$  und der Wassertiefe  $h$ <sup>1</sup>:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

Niedrige Fliessgeschwindigkeiten verhindern, dass die Schwemmhölzer beim Aufprall untereinander geschoben werden. Ein Anwachsen des Verklauungskörpers in die Tiefe findet somit nur sehr eingeschränkt statt. Es bildet sich vielmehr ein oberflächiger Schwemmholzteppich mit einer Dicke von wenigen Schwemmholzdurchmessern. Grosse Fliesstiefen führen dazu, dass genügend lichte Höhe unter dem Verklauungskörper verbleibt und etwaige abtauchende Hölzer das Bauwerk passieren können. Die  $Fr$ -Zahl kombiniert beide Effekte in dimensionsloser Form. Aus diesen Beobachtungen kann gefolgert werden, dass sich bei Talgewässern und kleiner  $Fr$ -Zahl nur lockere Verklauungskörper bilden bzw. dass diese nicht bis zur Sohle reichen. Eine Vollverklauung ist nicht zu erwarten. Stehende Gewässer, wie Teiche oder Seen, stellen den Extremfall der Betrachtung dar.

Aus Angaben von Laborversuchen lässt sich der Zusammenhang eines zunehmend kompakteren Verklauungskörpers mit steigender  $Fr$ -Zahl belegen, solange man im Bereich kleiner  $Fr$ -Zahlen ist (deutlich unter 1.0). Ein klarer Grenzwert lässt sich aus den Literaturangaben jedoch nicht festlegen. In [2] wird der Wert von  $Fr < 0.15$  als Grenzwert für einlagige Schwemmholzteppiche angegeben. Weiter wird angeführt, dass ab  $Fr \approx 0.3$  mehrlagige, kompaktere Verklauungskörper entstehen. Diese Studie beruht jedoch auf Versuchen mit sehr langsamen Zuströmverhältnissen.

Basierend auf diesen Überlegungen und Beobachtungen wird hier eine **maximale Froude-Zahl von  $Fr < 0.4$  beim  $HQ_{100}$**  als Abgrenzungskriterium für eine Teilverklauung empfohlen, falls das Gewässer nicht bereits die Mindestsohlenbreite erfüllt.

Bei schmalen Gewässern können bereits einzelne Wurzelstöcke zu einer Verklauung führen und ggf. dennoch unter das Talgewässer-Kriterium fallen. Aus diesem Grund wird das zusätzliche Kriterium der **Mindestsohlenbreite von  $B > 3$  m** empfohlen.

---

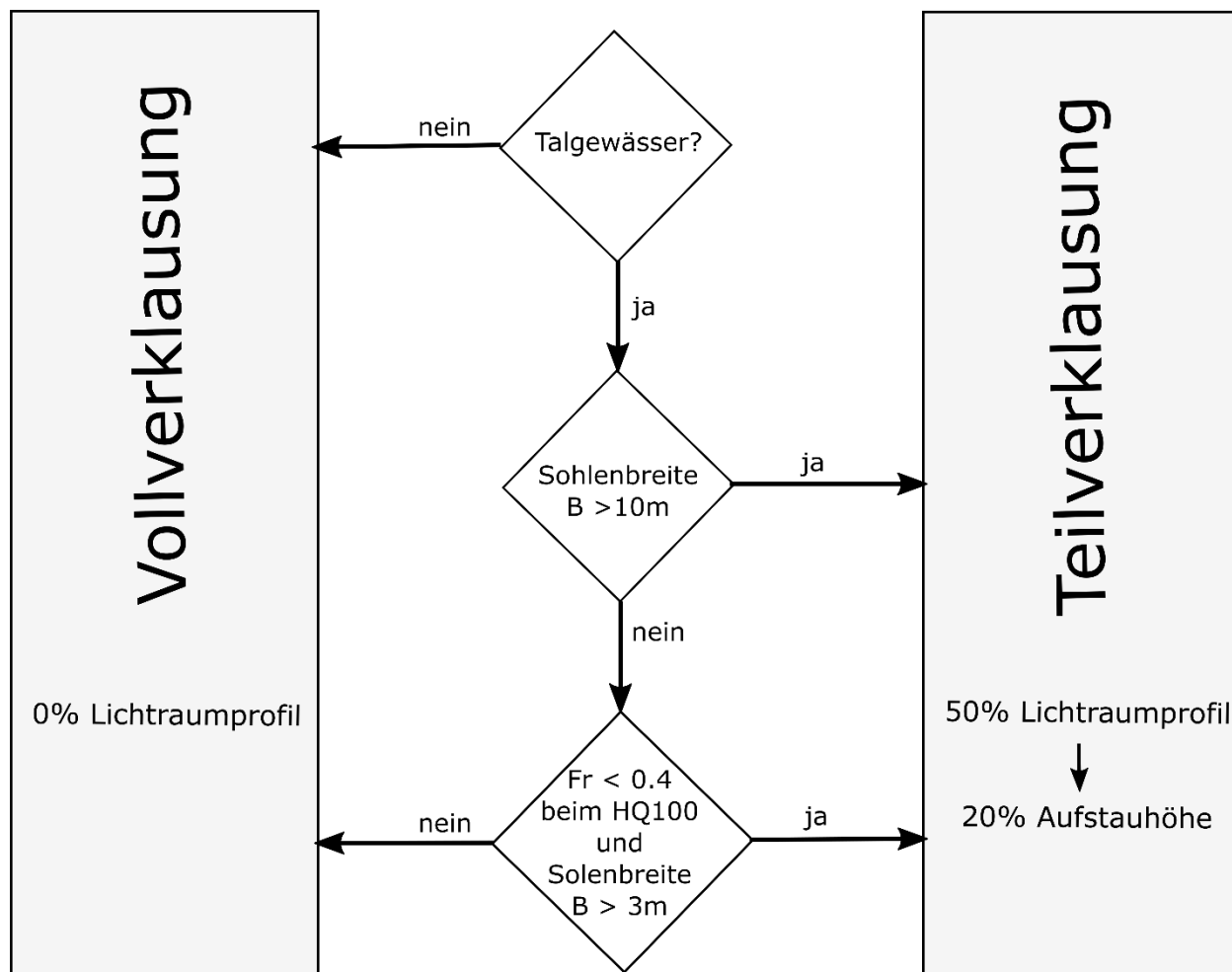
<sup>1</sup> Die Fliessgrössen beziehen sich auf den ungestörten Anströmbereich ca. zweimal die Gerinnebreite oberhalb der Brücke bzw. des Durchlasses. Es handelt sich dabei um gemittelte Grössen über den Fliessquerschnitt.

## 2.5 Zusammenfassung Beurteilung

Aus den Vorüberlegungen in diesem Kapitel ergibt sich folgender Ablauf für die Beurteilung von Teilverkläusung/Vollverkläusung für Talgewässer (Abbildung 2).

Weist das Talgewässer eine tiefe FR-Zahl oder eine breite Sohle auf, so kann von einer Teilverkläusung ausgegangen werden. Letztere führt zu deutlich geringeren Aufstauhöhen und Überflutungen als die Vollverkläusung und vermindert somit die Problematik von unrealistisch hohen Gefahreinschätzungen.

**Abbildung 2** Beurteilungsschema für Voll- oder Teilverkläusung





## 3 Festlegung der Auswirkungen der Teilverklausung

### 3.1 Einleitung

Es liegen keine weitreichenden empirischen Auswertungen zu Verklausungsgraden bei tatsächlichen Ereignissen in St. Gallen oder der Schweiz vor. Dies liegt vermutlich u.a. an den Schwierigkeiten den Grad der Verklausung zu beurteilen und dementsprechend fehlenden Aufzeichnungen. In Hinblick auf zukünftige Verbesserungen der Verklausungsbeurteilung wird empfohlen, auf eine möglichst detaillierte Aufnahme der Verklausungsgrade, der Holzmengen und Charakteristika (wie z. B. Dichte, Alter, Herkunft) bei Ereignissen hinzuwirken und diese Daten in Datenbanken abzulegen und über Suchbegriffe auswertbar zu machen. In der Literatur finden sich häufig keine genauen Angaben zu Verklausungsgraden oder stark schwankende Werte (z. B. 0-60% Verklausungsgrad im Laborversuch [4] bei allerdings höheren Fr-Zahlen).

### 3.2 Aufstauhöhe durch Teilverklausung

Der verursachte Aufstau durch ein teilverklaustes Bauwerk wird basierend auf den Ergebnissen aus Laborversuchen<sup>2</sup> und der fachlichen Einschätzung tatsächlicher Ereignisse festgelegt.

Bei Fr-Zahl = 0.4 wird ein zusätzlicher **Aufstau von  $\Delta h/h_0 \approx 20\%$**  im Bereich oberhalb der teilverklausten Brücke angenommen. Die Aufstauhöhe  $\Delta h$  wird dabei auf den unverklausten Zustand  $h_0$  bezogen. Bei niedrigeren Froude-Zahlen ist von tendenziell geringeren Aufstauhöhen auszugehen.

### 3.3 Umsetzung Aufstauhöhe in der Modellierung

#### 3.3.1 Zielsetzung und Vorgehen

In der numerischen Modellierung stellt nun die Frage, wie der Aufstau von 20% auf einfache Weise erzielt werden kann. Die Reduktion des Lichtraumprofils beim Bauwerk führt grundsätzlich zu einem Aufstau im Modell. Nachfolgend wird mit idealisierten Modellierungen untersucht, wie gross diese Reduktion des Lichtraumprofils sein muss, um den festgelegten Aufstau von 20% zu erzielen.

Es werden drei verschiedene Methoden untersucht, um Teilverklausungen durch Reduktion des Lichtraumprofils zu simulieren. Für die Modellierungen wird die 2D Modellierungssoftware flox-GPU [7] eingesetzt.

#### 3.3.2 Modellaufbau

Ein gerader Kanal wird gewählt mit hohen Seitenwände, um seitliche Ausuferungen zu verhindern (Kanalbreite 10.0m,  $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Das Gefälle des Kanals variiert im Bereich von 0.01 bis 5‰, was zu Fr-Zahlen im interessierenden Bereich von 0.2 bis 0.5 führt. Teilverklausungen und Vollverklausungen des Gewässers sind durch den Einbau von abrupten Reduktionen des Lichtraumprofils abgebildet. Bei Vollverklausungen wird dabei das Lichtraumprofil bis zur Brückenunterkante komplett blockiert. Die Brückenunterkante ist auf Höhe des Wasserspiegels angenommen und die Dicke der Brückenplatte oder etwaige Geländer werden vernachlässigt. Bei Teilverklausungen wird dagegen nur ein Anteil des Lichtraumprofils blockiert.

---

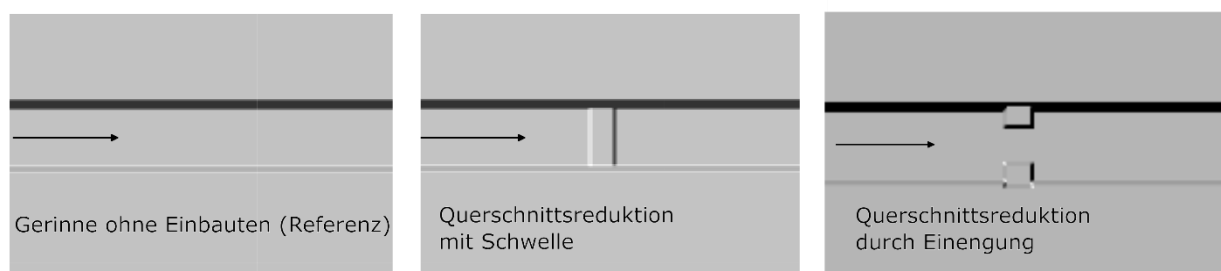
<sup>2</sup> Wegen der niedrigen Fr-Zahlen wird vor allem auf die Untersuchungen der TU München [2] Bezug genommen, obwohl die dort untersuchte Konfiguration von verklausten Wehrfeldern nicht identisch mit Brückenverklausungen ist.

Folgende drei Methoden für die Nachbildung von Teilverklausungen durch Reduktion des Lichtraumprofils werden untersucht:

- Einbau einer Sohlschwelle (Abbildung 3, Mitte)
- Beidseitige, seitliche Einengung des Kanals (Abbildung 3, Rechts)
- Einbau eines Schützes (Abbildung als hydraulisches Bauwerk im Modell).

Die ersten beiden Methoden sind grundsätzlich mit allen 1D und 2D Modellen gleichermassen abbildbar, da sie nur auf einer Veränderung der Gerinnegeometrie beruhen. Der Schütz- bzw. Brückenansatz verwendet dagegen eine hydraulische 1D Abflussbetrachtung und kann je nach verwendeter Software verschieden implementiert sein.

**Abbildung 3** Verschiedene Konfigurationen für die Abbildung der Teilverklausung



Eine Abbildung der Teilverklausung als einseitige Einengung von links oder von rechts in Analogie zu Wehrfeldern – wie in früheren Projekten vereinzelt umgesetzt – wird hier nicht weiter untersucht. Die asymmetrische Abbildung führt zur bevorzugten Ausuferung auf einer Seite, was als ungünstig beurteilt wird bzw. mehrerer Szenarien bedarf und somit den Aufwand ohne echten Nutzen erhöht.

### 3.3.3 Ergebnisse Modellierungen

Die Kalibrierung der Querschnittsreduktionen bei  $Fr=0.4$  auf 20% Aufstau führt zu folgenden benötigten Verklausungsgraden (=Querschnittsreduktion) für die drei Methoden im numerischen Modell:

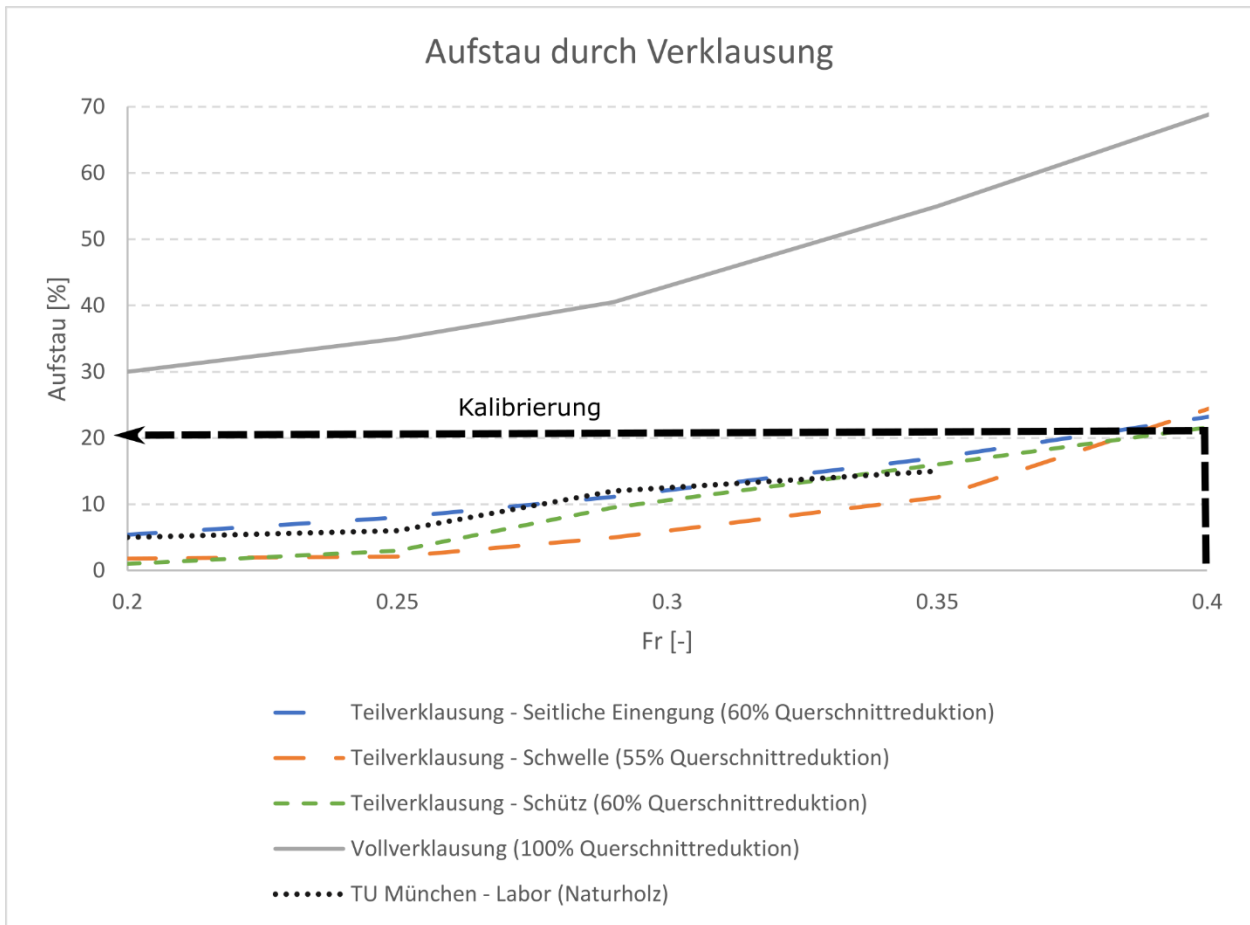
**Tabelle I** Verklausungsgrade für die Abbildung der Teilverklausung im numerischen Modell

	Schwelle	Seitliche Einengung	Schütz
Nötige Reduktion des Lichtraumprofils für 20% Aufstau	55%	60%	60%

Die seitliche Einengung des Querschnitts zeigt den nachteiligen Effekt einer grösseren Einschnürung, welche sich weiter nach unterstrom auswirkt als die Schwelle. Andererseits weist die seitliche Einengung die besten Übereinstimmungen mit den Labordaten in [2] überein. Bei niedrigeren  $Fr$ -Zahlen zeigen Sohlschwelle und Schütz etwas niedrigere Aufstau-Werte.

Abbildung 4 zeigt die modellierten Aufstauhöhen in Abhängigkeit der  $Fr$ -Zahl und stellt sie den Werten der Vollverklausung gegenüber. Der Aufstau bei der Teilverklausung ist bei  $Fr=0.4$  deutlich geringer als bei Vollverklausung, wobei der Unterschied mit sinkenden  $Fr$ -Zahlen abnimmt. Alle untersuchten Methoden zeigen einen monotonen Anstieg des Aufstaus mit steigender  $Fr$ -Zahl und führen zu vergleichbaren Resultaten. Die Abweichungen liegen unterhalb der sehr grossen Unsicherheiten der Schwemmholzproblematik. Daher können alle Methoden für die Modellierung der Teilverklausung empfohlen werden. Bei sehr kleinen  $Fr$ -Zahlen ( $<0.2$ ) verschwindet der Aufstau-Effekt weitgehend.

**Abbildung 4** Modellierter Aufstau aufgrund Teilverklauung



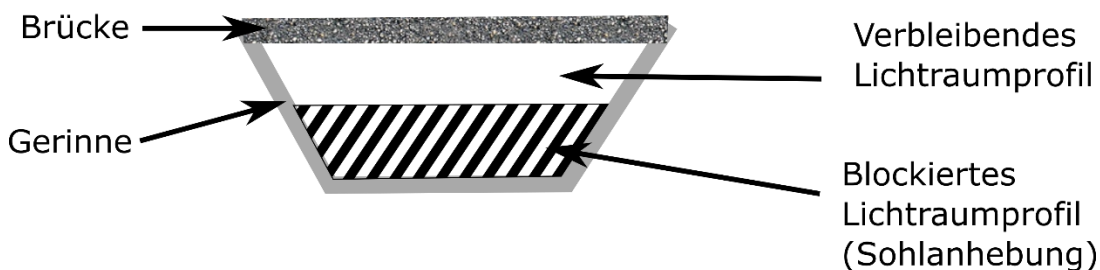
Die gepunktete Linie zeigt Laborergebnisse bei verklauten Wehrfeldern und niedrigen Geschwindigkeiten nach [2] bei der Verwendung von Naturholz.

Die durchgezogene Linie stellt den Aufstau einer Vollverklauung dar, d.h. bei vollständiger Blockierung des Brückenquerschnitts.

### 3.3.4 Festlegung Vorgehen Modellierung

Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten wird aus den Modellierungsergebnissen gefolgert, dass eine **Reduktion des Lichtraumprofils von rund 50%** notwendig ist, um den erwünschten Aufstau zu erreichen. Es wird empfohlen die Reduktion mit einer Sohlanhebung im Modell abzubilden (Abbildung 5).

**Abbildung 5** Reduktion des Lichtraumprofils durch Sohlanhebung des Gerinnes



Es wird darauf hingewiesen, dass diese Reduktion des Lichtraumprofils nur einen theoretischen Wert für die Modellierung darstellt. Der Verklauungskörper verursacht in der Realität hohe Reibungsverluste und Verwirbelungen der Strömung. Diese sind im numerischen Modell nicht berücksichtigt. Daher liegt diese Flächenreduktion des Lichtraumprofils tendenziell über dem realen Verklauungsgrad, welcher denselben hydraulischen Aufstau bewirkt (siehe auch [5]).

## 4 Zusammenfassung und Anwendungsfälle

### 4.1 Kriterien und Auswirkungen Teilverklauung

Die aktuelle Behandlung aller Verklauungen an Brücken und Durchlässen als vollständige Verklauung, d.h. die komplette Blockierung des Bauwerks, ist in einigen Situationen zu konservativ und überschätzt die Gefahrensituation. Aus diesem Grund wurden Kriterien für eine realistischere Beurteilung als Teilverklauung erarbeitet. Folgende Kriterien werden empfohlen:

- Talgewässer und Sohlenbreite des Gerinnes  $B > 10.0$  m
- Talgewässer und Fr-Zahl beim  $HQ_{100}$  im Anströmungsbereich  $< 0.4$  und Sohlenbreite  $B > 3.0$  m

Die hydraulischen Auswirkungen einer Teilverklauung eines Bauwerks werden folgendermassen beurteilt:

- Es ist eine Aufstauhöhe von ca. 20% der Wassertiefe oberhalb des Bauwerks zu erwarten. Dieser Wert bezieht sich auf einen Abstand von ca. zwei Gerinnebreiten oberhalb des Bauwerks.
- Für die hydraulische Modellierung von Teilverklauungen wird nun empfohlen das Lichtraumprofil beim Bauwerk um 50% zu reduzieren. Diese Flächenreduktion führt zum erwarteten Aufstau in der Grössenordnung von 20% bei  $Fr=0.4$ . Bei kleineren Fr-Zahlen führt die Reduktion im Modell zu tendenziell geringeren Aufstauhöhen.

### 4.2 Anwendungsfälle

Zur Beurteilung der Wirkungen der Teilverklauungen stehen in der Praxis zwei Anwendungsfälle im Vordergrund.

#### **Gutachterliche Beurteilung:**

Bei der Planung von Brückenbauten wird im Kanton St. Gallen die Praxishilfe [1] empfohlen, um die Verklauungswahrscheinlichkeit zu beurteilen. Darauf aufbauend bestimmt die nachfolgende Gefahrenanalyse die Verklauungsszenarien. Bei der Planung des Bauwerkes sind die Beurteilungskriterien gemäss Abbildung 2 für die Anwendung einer Teil- oder Vollverklauung zu prüfen.

Liegt gemäss der vorliegenden Praxishilfe eine Teilverklauung vor, kann der zu erwartende Wasserspiegelanstieg vor dem Bauwerk mit 20% Zuschlag in ausreichender Genauigkeit angenommen werden, um den hydraulischen Effekt der Teilverklauung zu quantifizieren. Der Wert ist für die Massnahmenplanung tendenziell auf der sicheren Seite. Eine nachträgliche Modellierung im Rahmen der Gefahrenabklärungen wird kaum unerfreuliche Überraschungen zeigen. Unabhängig davon bleiben die Bestimmungen zur Ermittlung des Freibordes (KOHS) und jene der Verklauungswahrscheinlichkeit gültig.

#### **Numerische Modellierung:**

Die numerische Modellierung im Rahmen der Gefahrenanalyse dient dazu, die flächigen Ausuferungen aufgrund von Teil- oder Vollverklauungen zu beurteilen. Hierbei helfen die Hinweise zu den Modellierungen gemäss Kapitel 3, die Teilverklauung realitätsnah im Modell nachzubilden. Die Verringerung des Lichtraumprofils beim teilverklaueten Bauwerk um 50% führt zu Wasserspiegelanstiegen

von höchstens 20%. Die Anstiege sind insbesondere von der Fr-Zahl abhängig, die sich aus Fliesstiefe und -geschwindigkeit berechnet (Kapitel 2.4).

Mithilfe dieser Angaben ist eine Teilverklausung im numerischen Modell durch die Anpassung des Lichtraumprofils unabhängig vom gewählten Simulationsprogramm (1D, 2D) modellierbar. Üblicherweise erfolgt die Anpassung durch eine Erhöhung der Sohlenlage des Gewässers beim Bauwerk im Rechnernetz. Es sind jedoch, in Abhängigkeit der Stärken und Fähigkeiten des Simulationsprogramms, auch alternative Ansätze zur Reduktion des Lichtraumprofils möglich.

St.Gallen, September 2017

## 5 Literatur und Grundlagen

- [1] Projektvorlage «Beurteilung der Verklauungsgefahr an Brücken oder Durchlässen», Tiefbauamt Kanton St. Gallen, April 2016.
- [2] Hartlieb, A. (2015). Schwemmholz in Fliessgewässern – Gefahren und Lösungsmöglichkeiten, Band 133, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.
- [3] Lange, D., Bezzola, G.-R. (2006). Schwemmholz – Probleme und Lösungsansätze, VAW Mitteilung 188, VAW ETH Zürich.
- [4] Gschnitzer, T., Gems, B., Mazzorana, B., Aufleger, M. (2017). Towards a robust assessment of bridge clogging processes in flood risk management, *Geomorphology* 279, 128-140.
- [5] Gems, B., Sendlhofer, A., Achleitner, S. Huttenlau, M., Aufleger, M. (2012). Verklauung von Brücken – Evaluierung verklauungsinduzierter Überflutungsflächen durch Kopplung eines physikalischen und numerischen Modells. 12ter Kongress Interpraevent Grenoble, Frankreich.
- [6] Bänziger, R. (1990). Schwemmholz im Unwettersommer 1987. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 47.
- [7] flox-GPU (Version 1.0), 2D hydraulisches Simulationsprogramm für Grafikkarten, Webseite: <http://www.flox-gpu.ch>, B. Loretz, C. Volz, Ingenieure Bart AG, St. Gallen, Schweiz, 2017.